



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Физика»

Практикум
по дисциплине
«Физика»

**«Определение
динамической вязкости
жидкости с помощью
вискозиметра Гепплера»**



Авторы
Павлов А.Н.,
Брылева М.А.

Ростов-на-Дону, 2022

Аннотация

Указания содержат краткую теорию по теме «Определение динамической вязкости жидкости с помощью вискозиметра Гепплера», описание рабочей установки и методику эксперимента.

Предназначено для обучающихся, изучающих дисциплину «Физика» для выполнения лабораторной работы по программе курса общей физики.

Авторы

д.ф.-м.н., профессор А.Н. Павлов,
к.ф.-м.н, ассистент М.А.Брылева





Оглавление

Лабораторная работа №27 Определение динамической вязкости жидкости с помощью вискозиметра Гепплера	4
Контрольные вопросы и тесты.....	10
Указания по технике безопасности.....	13

Лабораторная работа №27 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ С ПОМОЩЬЮ ВИСКОЗИМЕТРА ГЕППЛЕРА

Цель работы: ознакомиться с явлением внутреннего трения в жидкостях, изучить метод экспериментального определения динамической вязкости жидкости с помощью вискозиметра Гепплера.

Приборы и принадлежности: вискозиметр Гепплера, циркуляционный термостат, шарики, секундомер (рис.1).



Рис.1

1. Краткая теория

Внутреннее трение или вязкость характеризует свойство жидкости оказывать сопротивление относительному перемещению её слоёв. Действие внутреннего трения проявляется в том, что со стороны слоя, движущегося быстрее, на слой, движущийся медленнее, действует по касательной к

поверхности соприкосновения слоёв ускоряющая сила. Со стороны же слоя, движущегося медленнее, на слой движущийся быстрее, будет действовать в противоположном направлении тормозящая сила. Описанные силы, называемые силами внутреннего трения, обусловлены тепловым движением молекул жидкости, при котором между ними происходят столкновения, сопровождающиеся силовым взаимодействием.

Пусть в потоке жидкости величина скорости течения меняется на ΔV на расстоянии Δx вдоль оси Ox , перпендикулярной направлению движения потока, а площадь соприкосновения слоёв S . Тогда по формуле Ньютона сила внутреннего трения

$$F = \eta \left| \frac{\Delta V}{\Delta x} \right| S \quad (1)$$

Величина $\left| \frac{\Delta V}{\Delta x} \right|$ называется модулем градиента скорости течения жидкости в слоях. Она показывает, как быстро меняется скорость течения в направлении, перпендикулярном движению слоёв.

Коэффициент пропорциональности η , зависящий от природы жидкости и её температуры, называется динамической вязкостью. Из формулы (1) следует, что динамическая вязкость – это физическая величина, численно равная силе внутреннего трения, действующей на единицу площади поверхности слоя при градиенте скорости, равном единице.

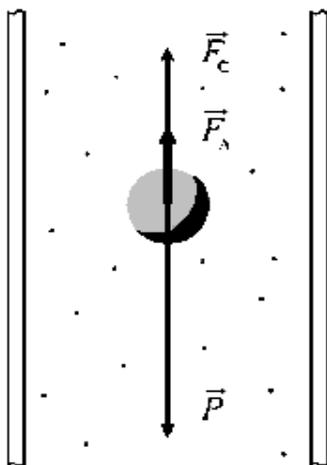
Внутреннее трение является причиной того, что на тело, движущееся в неподвижной жидкости, действует сила сопротивления, направленная противоположно движению. Движущееся тело увлекает за собой тонкий слой жидкости, “прилипающий” к его поверхности и имеющий одинаковую с ним скорость. С удалением от поверхности тела скорость слоёв жидкости постепенно падает и, таким образом, устанавливается градиент скорости, обусловленный силами внутреннего трения. Отсюда следует, что сила сопротивления обусловлена силой внутреннего трения между двумя ближайшими к телу слоями жидкости. Как показал Стокс, для тела сферической формы (шарика) радиуса r , движущегося в жидкости со скоростью V , сила сопротивления F_c , действующая на шарик: $F_c = 6\pi\eta rV$.

Это выражение справедливо, когда скорость падения шарика достаточно мала, чтобы слои жидкости, обтекающие

шарик, двигались относительно него только поступательно, что характерно для ламинарного течения, и за шариком не образовывались завихрения, когда отдельные микрообъёмы жидкости начинают вращаться вокруг некоторой мгновенной оси, что происходит при турбулентном течении.

Таким образом, если измерить величины r и u то по известной величине силы F_C , то можно рассчитать динамическую вязкость жидкости η . В этом состоит сущность метода определения η , предложенного Стоксом.

Рассмотрим свободное падение сферического тела (шарика) в неподвижной жидкости (рис. 2). На шарик действуют три силы:



– сила тяжести

$$P = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{ш} g \quad (2),$$

где $\rho_{ш}$ – плотность материала шарика;

– сила Архимеда

$$F_A = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{ж} g \quad (3),$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкости;

– сила сопротивления

$$F_C = 6\pi\eta r v \quad (4),$$

где v – скорость прилегающего к шарiku слоя жидкости, равная скорости падения шарика.

Рис. 2

Как видно из выражений (2) – (4), модули силы тяжести и выталкивающей силы постоянны, а модуль силы сопротивления пропорционален скорости падения шарика. Поэтому в начале своего падения в жидкости шарик движется ускоренно, так как сумма сил Архимеда и Стокса меньше силы тяжести, а затем наступает момент, когда силы уравниваются друг друга. Это означает, что $P - F_A - F_C = 0$. Отсюда $F_C = P - F_A$ (5)

Подставляя в уравнение (5) выражения (2), (3) и (4), получим формулу для определения динамической вязкости:

$$\eta = \frac{2(\rho_{ш} - \rho_{ж})}{9} g r^2 v \quad (6)$$

Скорость шарика можно определить, измеряя время t его падения в жидкости и расстояние l , которое он проходит в ней. Радиус шарика можно найти, измеряя диаметр шарика d . Таким образом, формула (6) для определения динамической вязкости примет вид:

$$\eta = \frac{(\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}})d^2t}{18l} gr^2 \quad (7)$$

Уравнение (4) описывает только сопротивление, действующее на шарик в случаях, когда диаметр, измерительного цилиндра, заполненного жидкостью, намного больше диаметра шарика. Для этого потребовалось бы очень большое количество исследуемой жидкости. Поэтому на практике обычно используют вискозиметр Гепплера с падающим шариком, в котором цилиндр наклонен относительно вертикали, так что шарик опускается, скатываясь и соскальзывая по стенке трубки. В этом случае выражение для динамической вязкости выглядит следующим образом.

$$\eta = tK(\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}}) \quad (8)$$

Здесь K – калибровочный коэффициент.

2. Описание экспериментальной установки и методика измерения



Вискозиметр Гепплера (рис.3) для измерения динамической вязкости жидкости состоит из прозрачного измерительного цилиндра внутри прозрачного корпуса водяной бани, предусматривающего циркуляцию термостатирующей жидкости. На цилиндре находятся две кольцевые метки. Верхняя метка располагается ниже уровня жидкости с таким расчётом, чтобы шарик, проходя мимо этой метки, уже имел установившуюся скорость.

Рис.3

3. Порядок выполнения работы

1. Калибровка прибора с шариком из боросиликатного стекла.
 - 1.1. Заполните измерительный цилиндр дистиллированной водой.
 - 1.2. Термостатируйте вискозиметр при $T=298$ К.
 - 1.3. Пять раз измерьте время движения шарика между отметками измерительного цилиндра.
 - 1.4. Внесите результаты измерений в таблицу 1.
 - 1.5. Определите $t_{\text{ср}}^{\text{ДВ}}$ и результаты занесите в таблицу 1.

$$t_{\text{ср}}^{\text{ДВ}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 t_i^{\text{ДВ}}$$

- 1.6. Произведите расчет калибровочного коэффициента K и результаты занесите в таблицу 1.

$$K = \frac{\eta_{\text{ДВ}}}{(\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ДВ}}) t_{\text{ср}}^{\text{ДВ}}}$$

Здесь $\eta_{\text{ДВ}} = 0,897 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $\rho_{\text{ДВ}} = 0,997 \cdot 10^3$ кг/м³,
 $\rho_{\text{ш}} = 2,23 \cdot 10^3$ кг/м³.

- 1.7. Произведите расчет ошибки определения калибровочного коэффициента ΔK и результаты занесите в таблицу 1.

$$\Delta K = \frac{\eta_{\text{ДВ}} \Delta t^{\text{ДВ}}}{(\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ДВ}}) (t_{\text{ср}}^{\text{ДВ}})^2}$$

Здесь

$$\Delta t^{\text{ДВ}} = \frac{1}{5} \sqrt{\sum_{i=1}^5 (t_i^{\text{ДВ}} - t_{\text{ср}}^{\text{ДВ}})^2}$$

Таблица 1

$t_1^{ДВ}$, с	$t_2^{ДВ}$, с	$t_3^{ДВ}$, с	$t_4^{ДВ}$, с	$t_5^{ДВ}$, с	$t_{ср}^{ДВ}$, с	$\Delta t^{ДВ}$, с	K , Па·м ³ ·кг ⁻¹	ΔK , Па·м ³ ·кг ⁻¹

2. Определение динамической вязкости исследуемой жидкости.

- 2.1. Заполните измерительный цилиндр исследуемой жидкостью.
- 2.2. Термостатируйте вискозиметр при $T=298$ К.
- 2.3. Пять раз измерьте время движения шарика между отметками измерительного цилиндра.
- 2.4. Внесите результаты измерений в таблицу 2.
- 2.5. Определите $t_{ср}^{ж}$ и результаты занесите в таблицу 2.

$$t_{ср}^{ж} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 t_i^{ж}$$

- 2.6. Произведите расчет вязкости исследуемой жидкости и результат занесите в таблицу 2.

$$\eta = t_{ср}^{ж} K (\rho_{ш} - \rho_{ж})$$

- 2.7. Произведите расчет ошибки определения вязкости, результат занесите в таблицу 2

$$\Delta \eta = (\Delta t^{ж} \cdot K + t_{ср}^{ж} \cdot \Delta K) (\rho_{ш} - \rho_{ж})$$

Здесь

$$\Delta t^{ж} = \frac{1}{5} \sqrt{\sum_{i=1}^5 (t_i^{ж} - t_{ср}^{ж})^2}$$

Таблица 2

$t_1^{\text{ж}}$, с	$t_2^{\text{ж}}$, с	$t_3^{\text{ж}}$, с	$t_4^{\text{ж}}$, с	$t_5^{\text{ж}}$, с	$t_{\text{ср}}^{\text{ж}}$, с	$\Delta t^{\text{ж}}$, с	η , Па·с	$\Delta \eta$, Па·с

3. Запишите окончательный результат работы в виде:

$$\eta_{\text{ж}} = \eta \pm \Delta \eta \text{ (Па}\cdot\text{с)}.$$

Контрольные вопросы и тесты

1. Как возникает внутреннее трение в жидкости?
2. Какие силы действуют на шарик, падающий в жидкости?
3. При каких условиях выполняется формула Стокса?
4. Почему верхняя кольцевая метка устанавливается ниже уровня жидкости в цилиндре?
5. Выведите формулу для определения динамической вязкости методом Стокса.
6. Для тестов, приведенных далее, выберите правильный вариант ответа:

ЗАДАНИЕ № 1

Внутреннее трение является следствием переноса между слоями жидкости...

ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:

- 1) массы;
- 2) энергии;
- 3) механического импульса молекул;
- 4) электрического заряда молекул.

ЗАДАНИЕ № 2

Силы внутреннего трения, возникающие при относительном движении смежных слоёв жидкости направлены...

ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:

- 1) перпендикулярно слоям вверх;
- 2) перпендикулярно слоям вниз;
- 3) под углом к поверхности слоёв;
- 4) по касательной к поверхности слоёв.

ЗАДАНИЕ № 3

Динамическая вязкость численно равна...

ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:

- 1) силе, действующей на единицу площади поверхности смежных слоёв;
- 2) силе, действующей на единицу площади поверхности смежных слоёв при разности скоростей слоёв равной единице;
- 3) силе, действующей на единицу площади, нормальной к силе сопротивления;
- 4) силе, действующей на единицу площади при единичном градиенте скорости.

ЗАДАНИЕ № 4

Динамическая вязкость в системе единиц СИ измеряется В...

ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:

- 1) Па·с;
- 2) Па/с ;
- 3) Н·м/с;
- 4) кг·м/с.

ЗАДАНИЕ № 5

При определении динамической вязкости методом Стокса движение шарика в жидкости должно быть...

ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:

- 1) равноускоренным;
- 2) свободным падением;
- 3) равномерным;
- 4) равнозамедленным.

ЗАДАНИЕ № 6

Почему верхняя метка на цилиндре находится не у поверхности жидкости?

ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:

- 1) Чтобы уменьшить расстояние, которое проходит шарик в жидкости;
- 2) Чтобы повысить точность измерения расстояния, пройденного шариком;
- 3) Потому что вязкость жидкости неодинакова по высоте цилиндра;
- 4) Для достижения постоянства скорости падения.

ЗАДАНИЕ № 7

Имеется два шарика из одного и того же металла, но разного диаметра. У какого из них скорость падения в жидкости будет больше?

ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:

- 1) У шарика большего диаметра;
- 2) У шарика меньшего диаметра;
- 3) Скорость падения будет одинакова.

ЗАДАНИЕ № 8

Влияние стенок цилиндра, в котором падает шарик...

ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:

- 1) завышает результат измерения динамической вязкости;
- 2) занижает результат измерения динамической вязкости;
- 3) не влияет на результат.

Указания по технике безопасности

1. **Внимание!** Лица, не прошедшие инструктаж по технике безопасности, к проведению лабораторной работы не допускаются.

Запрещается:

2. При работе с механическими установками будьте внимательны и находитесь от движущихся частей на безопасном расстоянии.
3. Не останавливайте руками вращающиеся и движущиеся части установок.
4. При обнаружении неисправного оборудования немедленно сообщайте об этом лаборанту или преподавателю. На неисправном оборудовании работать запрещается.